

文章编号: 1002-0268 (2009) 02-0068-05

桥墩截面形式对弯连续刚构桥 地震响应的影响

周勇军, 贺拴海, 张 岗, 宋一凡

(长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 为了研究桥墩截面形式对弯连续刚构桥动力及地震响应的影响, 以某工程实例为背景, 建立了空间有限元分析模型, 研究了桥墩外形尺寸、截面面积、截面纵向刚度等参数对结构自振特性的影响, 在此基础上, 利用线弹性时程法, 对比分析了这些参数变化对空心墩与实心墩结构地震响应的影响。研究表明, 桥墩截面形式的不同使得结构的振型系列发生了改变, 具有空心墩的连续刚构桥与具有实心墩的连续刚构桥相比, 当两者的外形尺寸相同时, 前者的频率较低, 当两者桥墩面积相同时, 前者频率较高, 在纵向刚度相同的情况下, 前者频率稍低; 采用空心墩时, 墩底应力及主梁位移比相应实心墩的小, 当桥墩纵向刚度相同时, 空心墩和实心墩的地震响应基本相同。

关键词: 桥梁工程; 弯连续刚构桥; 时程分析法; 有限元; 地震响应

中图分类号: U442.5⁺5

文献标识码: A

Effect of Pier Section Type on Seismic Response of Curved Continuous Rigid Frame Bridge

ZHOU Yongjun, HE Shuanhai, ZHANG Gang, SONG Yifan

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University,
Xi'an Shaanxi 710064, China)

Abstract: In order to study the influence of pier section on the dynamic and seismic responses of curved continuous rigid frame bridge, a current bridge was taken as an example, and its finite element model was set up to analyze three parameters' effects on the structure's natural vibration characteristics. The parameters include external dimensions, section area and section longitudinal rigidity of the pier. Then liner elastic time history analysis method was adopted to deduce the effects of the parameters on the seismic response of hollow pier or solid pier structure. The results show that the mode shape sequence changes with different section types of the pier: for the continuous rigid frame bridges, (1) if the external dimensions of the hollow pier is the same to that of the solid pier, the frequencies of the former are lower than those of the latter; (2) if the section areas of the two kinds of pier are the same, the frequencies of the former are higher than those of the latter; (3) if the two kinds of pier have the same longitudinal rigidity, the seismic response of the former is basically as same as that of the latter. (4) under the earthquake excitation, the stress at the bottom of the hollow pier and the displacement of the superstructure are less than those of bridge with solid pier.

Key words: bridge engineering; curved continuous rigid frame bridge; time history analysis method; FEM; earthquake response

收稿日期: 2007-07-30

基金项目: 交通部西部交通建设科技资助项目 (200231822329)

作者简介: 周勇军 (1978-), 男, 湖北孝昌人, 博士, 副教授, 研究方向为桥梁结构动力分析. (zyj@gl.chd.edu.cn)

0 引言

连续刚构桥由于其良好的力学性能在公路建设上得到了广泛的应用, 是目前我国大中跨径桥梁常用的结构形式, 据不完全统计, 在国际上, 跨径超过 240 m 的连续刚构桥, 我国就占有 11 座, 约占世界同类桥梁的 60% 之多。在高原、沟壑及山区修建高速公路时, 由于地形、地质的限制, 不得不采用弯桥结构形式, 在这些地区修建的桥梁, 往往集高墩、大跨、弯桥于一身, 对该类桥梁设计、施工方法及施工控制等进行研究是目前热点问题。周军生等人对连续刚构桥静力设计参数进行了研究^[1-3], 王常峰等人从动力方面进行了参数优化分析^[4-5], 其他学者在抗震分析方法及动力试验等方面进行了大量研究^[6-9]。目前连续刚构桥双薄壁墩一般采用 2 种形式, 即空心墩和实心墩, 但以前的文献很少研究这 2 种截面形式对桥梁结构动力性质的影响。本文针对目前高墩大跨径连续刚构桥中这 2 种截面形式进行了自振特性及地震响应的对比分析, 其研究结果可供桥梁初步设计阶段及抗震概念设计参考。

1 工程背景

沪瑞国道主干线上的某弯连续刚构桥, 其跨径组合为 (68+120+68) m, 该桥平面位于 $R=620$ m 的圆曲线上。主梁为变截面单箱单室结构, 箱梁上顶板宽 12.0 m, 下底板宽 6.5 m, 墩梁结合处梁高 6.8 m, 现浇段和 1/2 合龙段梁高均为 2.5 m, 梁高及底板厚度均按 1.5 次抛物线变化。下部结构采用钢筋混凝土

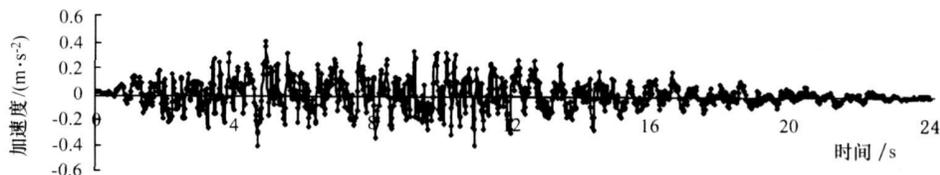


图 1 地面加速度时程曲线

Fig 1 Ground acceleration curve

根据高墩大跨桥梁结构的特点, 在时程分析计算地震作用时适当地考虑了竖向地震作用 (竖向地震按纵向 (横向) 的 1/3 倍采用), 考虑竖向地震作用时的分析模型如图 2 所示。

3 自振特性分析

结构的自振特性取决于结构本身的材料特性和结构刚度、质量分布规律及其约束条件, 是进行结构动力响应计算或抗震分析的前提, 有时也可以作为对结

双薄壁式实心墩, 其墩高 70~80 m, 截面尺寸为 2×6.5 m, 主桥上下部均采用 50# 混凝土。设计荷载: 汽车-超 20 级, 挂车-120。地震裂度: 基本裂度为 VI 度, 按 VII 度设防。

为了对比研究空心墩与实心墩对连续刚构桥梁的自振特性及地震响应的影响, 拟用的双薄壁墩采用以下 4 种截面形式: 工况 1: 空心墩桥墩截面尺寸 $2 \text{ m} \times 6.5 \text{ m}$, 壁厚 0.4 m; 工况 2: 空心墩桥墩截面尺寸 $3.5 \text{ m} \times 6.5 \text{ m}$, 壁厚 0.75 m; 工况 3: 空心墩桥墩截面尺寸 $2.1 \text{ m} \times 6.5 \text{ m}$, 壁厚 0.5 m; 工况 4: 实桥桥墩即实心墩。其中:

- (1) 工况 1 与实心墩的截面外形尺寸相同;
- (2) 工况 2 与实心墩的截面面积相同;
- (3) 工况 3 与实心墩的纵桥向刚度相同。

2 计算模型

利用大型有限元程序 ANSYS 建立了空间有限元分析模型, 其中, 主梁和桥墩均离散为空间梁 beam188 单元。由于桥梁所处场地地基条件较好, 在计算时认为墩底固结, 不考虑桩土共同作用。主桥在边墩处约束竖向位移、横向位移及扭转。坐标轴约定: 主梁两端头的连线为 X 轴 (纵桥向), 与之垂直平面内的轴为 Y 轴 (横桥向), 桥梁竖向为 Z 轴。

采用线弹性时程分析法进行结构的地震响应分析。阻尼为瑞利阻尼^[10-11], 不计行波效应。地震波采用 50 a 超越概率 10% 的人工合成地震波, 其加速度峰值为 0.40 m/s^2 (图 1)。

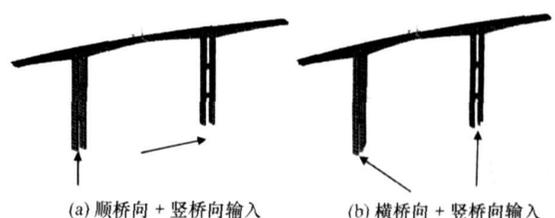


图 2 地震波输入示意

Fig 2 Earthquake wave input

构损伤识别和质量评定的依据。4 种结构形式的前 10

频率及振型见表1所示。

表1 不同桥墩截面形式的连续刚构桥自振特性对比分析

Tab 1 Dynamic feature comparison of continuous rigid frame bridges with different pier types

阶次	工况1(空心墩)		工况2(空心墩)		工况3(空心墩)		工况4(空心墩)	
	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述
1	0.346	桥墩纵弯	0.406	桥墩对称横弯	0.354	桥墩对称横弯	0.365	桥墩对称横弯
2	0.349	桥墩对称横弯	0.563	桥墩纵弯	0.368	桥墩纵弯	0.377	桥墩纵弯
3	0.895	桥墩反对称横弯	0.853	桥墩反对称横弯	0.888	桥墩反对称横弯	0.834	桥墩反对称横弯
4	1.285	主梁对称竖弯	1.562	主梁对称竖弯	1.315	主梁对称竖弯	1.256	主梁对称竖弯
5	1.523	桥墩纵弯 主梁竖弯	2.011	主梁对称横弯	1.581	桥墩纵弯 主梁竖弯	1.451	桥墩反对称纵弯
6	1.620	桥墩纵弯 主梁竖弯	2.300	桥墩纵弯 主梁竖弯	1.683	桥墩纵弯 主梁竖弯	1.558	桥墩纵弯 主梁竖弯
7	2.025	主梁对称横弯	2.454	桥墩纵弯 主梁竖弯	2.021	主梁对称横弯	1.959	主梁对称横弯
8	2.426	主梁反对称竖弯	2.669	桥墩横弯 主梁扭转	2.471	主梁反对称竖弯	2.495	桥墩横弯 主梁扭转
9	2.526	桥墩横弯 主梁扭转	2.868	桥墩横弯 主梁扭转	2.541	桥墩横弯 主梁扭转	2.581	主梁反对称竖弯
10	2.705	桥墩横弯 主梁扭转	2.951	主梁对称竖弯	2.723	桥墩横弯 主梁扭转	2.683	桥墩横弯 主梁扭转

由表1可以看出,桥墩截面形式的不同使结构的振型序列发生了改变,其中除了工况1下第1阶振型为纵向振动外,其他几个工况下结构的第1阶振型均

表2 “纵桥向+竖桥向”地震波下结构响应最大值

Tab 2 The maximum response of the structure under the longitudinal and vertical excitations

工况	主梁竖向弯矩/($\times 10^7$ N·m)				主梁扭矩/($\times 10^5$ N·m)				墩底应力/MPa	主梁纵向位移/cm		
	边跨跨中	边跨根部	中跨根部	中跨跨中	边跨跨中	边跨根部	中跨根部	中跨跨中		边跨跨中	主梁根部	中跨跨中
工况1	0.59	1.09	1.15	0.11	3.61	6.90	4.56	2.49	2.70	3.46	3.48	3.42
工况2	0.87	1.44	1.68	0.10	3.31	7.20	9.28	3.11	2.44	2.37	2.41	2.34
工况3	0.65	1.10	1.41	0.11	3.85	6.24	5.61	2.66	2.89	3.60	3.62	3.58
工况4	0.60	1.02	1.36	0.13	3.50	5.59	6.10	2.65	3.15	3.54	3.57	3.52

注:边跨根部指边跨双薄壁墩肢处主梁根部,中跨根部指中跨双薄壁墩肢处主梁根部,下同。

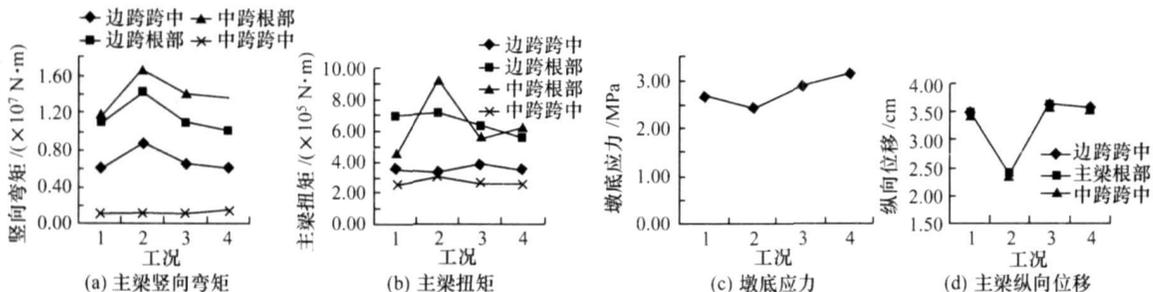


图3 “纵桥向+竖桥向”地震波下结构内力及位移响应曲线

Fig 3 The structural internal force and displacement under the longitudinal and vertical excitations

为横向振动。外形尺寸相同的空心墩比实心墩刚度小,频率低,在面积相同的情况下,空心墩的刚度比实心墩大,频率高,在纵向刚度相同的情况下,空心墩因面积较实心墩的大,故相应的频率稍低,在所有模型分析中,工况2的基频最高。

4 地震响应分析

选择主梁边跨跨中、根部、中跨跨中及桥墩墩底作为内(应)力观测截面,主梁边跨跨中、根部(或墩顶)及中跨跨中位移作为变形观测点。在“纵向+竖向”地震作用下,4种工况下上部结构主梁内力、位移及下部结构桥墩应力最大值列于表2及图3。在“横向+竖向”地震作用下,上部结构主梁内力、位移及下部结构桥墩应力最大值列于表3及图4。

由表2、图3和表3、图4可以看出:

(1)对上部结构主梁来说,当纵向输入地震波时,工况1下,采用空心墩除个别部位外,其他部位主梁竖向弯矩均小于实心墩15%左右;边跨主梁扭矩较实心墩的平均大13%,而中跨则小15%。工况2下,采用空心墩除中跨跨中竖向弯矩比实心墩的小21%外,其余部分弯矩均较实心墩的大23%~44%;除个别部位外,空心墩的主梁扭矩较实心墩的平均大30%。工况3情况下,采用空心墩时除中跨跨中竖向弯矩比实心墩的小18%外,其余均较实心墩的大3%~8%;除个别部位外,大部分主梁扭矩较实心墩的

表 3 “横桥向+竖桥向”地震波下结构响应最大值

Tab. 3 The maximum response of the structure under the transverse and vertical excitations

工况	主梁竖向弯矩 / ($\times 10^7 \text{N}\cdot\text{m}$)				主梁扭矩 / ($\times 10^5 \text{N}\cdot\text{m}$)				墩底应力 / MPa	主梁纵向位移 / cm		
	边跨跨中	边跨根部	中跨根部	中跨跨中	边跨跨中	边跨根部	中跨根部	中跨跨中		边跨跨中	主梁根部	中跨跨中
工况 1	1.10	1.56	1.54	2.63	4.74	5.01	1.57	0.19	1.77	1.71	3.18	4.80
工况 2	1.26	1.66	1.22	2.85	4.39	4.75	1.89	0.16	1.58	1.60	2.89	4.45
工况 3	1.10	1.60	1.56	2.78	5.09	5.34	1.61	0.19	1.79	1.78	3.32	5.06
工况 4	1.12	1.63	1.65	3.12	5.39	5.64	1.80	0.19	1.93	1.90	3.51	5.29

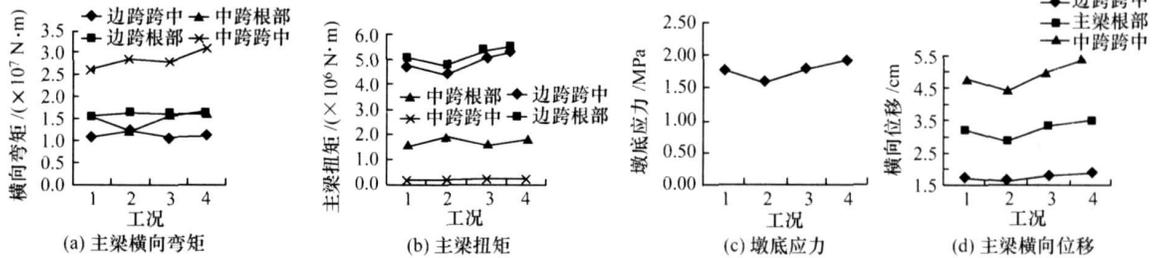


图 4 “横桥向+竖桥向”地震波下结构内力及位移响应曲线

Fig. 4 The structural internal force and displacement under the transverse and vertical excitations

平均大 7%。当横向输入地震波时, 工况 1 下, 采用空心墩时主梁的横向弯矩比实心墩的平均小 7%, 主梁扭矩小 12%。工况 2 空心墩的边跨跨中及根部横向弯矩比实心墩的平均大 8%, 中跨根部及中跨跨中的横向弯矩比实心墩的小 17%; 除个别部位外, 大部分主梁扭矩比实心墩的小 16%。工况 3 空心墩的主梁横向弯矩比实心墩的平均小 5%, 空心墩的主梁扭矩比实心墩的平均小 5%。

(2) 对桥墩墩底来说, 当纵向输入地震波时, 工况 1 下, 采用空心墩时墩底应力比实心墩的小 14%, 工况 2 情况下空心墩较实心墩的墩底应力小 20%, 工况 3 时前者则比后者小 8%; 当横向输入地震波时, 3 种工况下空心墩的墩底应力比实心墩的分别小 8%、18%、7%。

(3) 对主梁的位移来说, 纵桥向输入地震波时, 工况 1、工况 2 空心墩主梁纵向位移比实心墩的小 3%及 33%, 而工况 3 空心墩主梁纵向位移比实心墩的大 2%。横向输入地震波时, 3 种工况下空心墩主梁横向位移比实心墩的分别小 9%、16%及 5%。

5 结论

对双薄壁墩的 3 种不同的截面形式的空心墩与实心墩进行了自振特性及地震响应的对比分析, 主要结论如下:

(1) 桥墩截面形式的不同改变了振型的序列, 从而使结构的动力特性发生了变化。在外形尺寸相同时, 空心墩比实心墩频率低, 在面积相同的情况下,

空心墩的比实心墩频率高, 在纵向刚度相同的情况下, 空心墩的频率低。

(2) 在几种情况下, 采用空心墩时主梁最大弯矩及扭矩的地震响应变化复杂, 但墩底应力基本上是空心墩的小于实心墩的, 主梁位移也是空心墩的较小。

(3) 纵向刚度相同时, 采用空心墩和实心墩的地震响应区别不大。

参考文献:

References.

[1] 周军生, 楼庄鸿. 大跨径预应力混凝土连续刚构桥的现状和发展趋势 [J]. 中国公路学报, 2000, 13 (1): 31-37.
 ZHOU Junsheng, LOU Zhuanghong. The Status Quo and Developing Trends of Large Span Prestressed Concrete Bridges with Continuous Rigid Frame Structure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13 (1): 31-37.

[2] 李艳明, 王留洋. 空心墩和实心墩对连续刚构桥受力影响的比较 [J]. 铁道标准设计, 2005 (6): 63-65.
 LI Yanming, WANG Liuyang. Hollow Pier and Solid Pier to the Forces on Continuous Framed Structure Bridge [J]. Railway Standard Design, 2005 (6): 63-65.

[3] 徐君兰, 顾安邦. 连续刚构桥主墩刚度合理性的探讨 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (2): 59-62.
 XU Junlan, GU Anbang. Discussion of Rationality of Rigidity of Continuous Rigid Frame Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (2): 59-62.

[4] 王常峰, 陈兴冲, 夏修身. 高墩大跨连续刚构桥抗震

- 设计参数优化 [J] . 公路交通科技, 2006, 23 (4): 80—83.
- WANG Changfeng, CHEN Xingchong, XIA Xiushen Optimization of Design Parameters of High-pier and Long-span Continuous Rigid Frame Bridge [J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (4): 80-83.
- [5] 周勇军, 全伟, 贺拴海. 基于正交试验的连续刚构桥地震响应敏感性参数分析 [J] . 地震研究, 2006, 29 (2): 176—181.
- ZHOU Yongjun, QUAN Wei, HE Shuanhai. Analysis on Sensitive Parameters to Earthquake Response of Continuous Rigid Frame Bridges Based on Cross Test Technique [J] . Journal of Seismological Research, 2006, 29 (2): 176—181.
- [6] 周勇军, 贺拴海, 宋一凡, 等. 连续刚构桥单双薄壁墩地震响应的对比分析 [J] . 中外公路, 2007, 27 (3): 114—117.
- ZHOU Yongjun, HE Shuanhai, SONG Yifan, et al Comparison of Earthquake Response of Continuous Rigid Frame Bridge with Single or Double Thin-wall Pier [J] . Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27 (3): 114—117.
- [7] 王波, 张海龙, 武修雄, 等. 基于大质量法的高墩大跨连续刚构桥地震时程反应分析 [J] . 桥梁建设, 2006 (5): 17—20.
- WANG Bo, ZHANG Hailong, WU Xiuxiong, et al Analysis of Seismic Time-history Response of High-rise Pier and Long Span Continuous Rigid-frame Bridge Based on Great Mass Method [J] . Bridge Construction, 2006 (5): 17—20.
- [8] 何波, 朱宏平, 李俊, 等. 大跨薄壁墩连续刚构桥抗震性能分析 [J] . 华中科技大学学报 (城市科学版), 2006, 23 (4): 51—56.
- HE Bo, ZHU Hongping, LI Jun, et al Antiseismic Performance Analysis of a Large-span Continuous Rigid Frame Bridge [J] . Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2006, 23 (4): 51—56.
- [9] 周勇军, 贺拴海, 宋一凡, 等. 基于锤击法的弯连续刚构模型桥动力试验 [J] . 振动、测试与诊断, 2007, 27 (3): 212—215.
- ZHOU Yongjun, HE Shuanhai, SONG Yi-fan, et al Dynamic Test of Curved Continuous Rigid Frame Bridge Model Using Hammer Excitation Method [J] . Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2007, 27 (3): 212—215.
- [10] 范立础. 桥梁抗震 [M] . 上海: 同济大学出版社, 1997.
- FAN Lichu Earthquake Resistance of Bridge [M] . Shanghai: Tongji University Press, 1997.
- [11] 宋一凡. 公路桥梁动力学 [M] . 北京: 人民交通出版社, 2000.
- SONG Yifan Dynamic Mechanics of Highway Bridge [M] . Beijing: China Communications Press, 2000.

(上接第59页)

- SONG Huamao. Loading Tests Computation of Chongqing Egongyan Changjiang Bridge [C] //Proceedings of the 5th Annual Conference of Shanghai Highway and Transportation Society Shanghai: Editorial Dept of Shanghai Highway, 2001: 129—132.
- [7] 吉林, 冯兆祥. 江阴大桥动静载试验与分析 [J] . 华东公路, 2001 (1): 36—39.
- Ji Lin, FENG Zhaoxiang. Static and Dynamic Load Test and Analysis of Jiangyin Bridge [J] . East China Highway, 2001 (1): 36—39.
- [8] 许汉铮, 黄平明, 杨炳成. 大跨径悬索桥静载试验研究 [J] . 公路, 2003 (9): 1—7.
- XU Hanzheng, HUANG Pingming, YANG Bingcheng. Research on Static Load Test of Long Span Suspension Bridge [J] . Highway, 2003 (9): 1—7.
- [9] 李传习. 混合梁悬索桥非线性精细计算理论研究 [D] . 长沙: 湖南大学, 2006: 16—51.
- LI Chuanxi. A Refined Non-linear Analysis Method for Suspension Bridge with Hybrid Beam and Its Application [D] . Changsha: Hunan University, 2006: 16—51.